第29卷 第6期
2015 年 6 月
材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH
Vol. 29 No. 6
June 2015

# 热处理工艺对中碳低合金钢力学性能的影响*

潘 伟 李祖来 山 泉 蒋业华 冯志扬 周 荣

(昆明理工大学材料科学与工程学院 昆明 650093)

**摘 要** 用水冷+盐浴等温淬火、空冷+盐浴等温淬火和直接盐浴等温淬火等方式对中碳低合金钢进行热处理, 借助彩色金相技术和XRD分析方法研究了热处理方式对合金钢组织、力学性能的影响, 并探索了性能与组织的关联性。结果表明, 对中碳低合金钢进行空冷+盐浴等温淬火和水冷+盐浴等温淬火热处理, 可得到不同下贝氏体含量的贝氏体/马氏体复相组织, 材料的性能比铸态有大幅度地提高, 冲击韧性提高92%−183%、硬度提高31%−55%。对材料进行空冷+盐浴等温淬火热处理, 随着空冷时间的增加复相组织中下贝氏体含量逐渐降低、马氏体含量逐渐升高, 而硬度和冲击韧性分别呈增加和降低趋势。中碳低合金钢的性能与各组织的含量密切相关, 当下贝氏体含量为30%−40%、马氏体含量50%−60%时, 贝氏体/马氏体复相组织强韧性匹配较好, 材料具有较高的综合性能。

**关键词** 金属材料, 贝氏体/马氏体复相组织, 等温淬火, 彩色金相, 韧性断裂

**分类号** TG142 文章编号 1005-3093(2015)06-0422-07

# Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties of a Medium Carbon Low Alloy Steel

PAN Wei LI Zulai** SHAN Quan JIANG Yehua FENG Zhiyang ZHOU Rong

*(School of Materials Science and Engnineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)*

*Supported by Yunnan Provincal Science and Technology Department No. 619320130010.

Manuscript received December 17, 2014; in revised form March 5, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: 13888516050, E-mail: lizulai@126.com

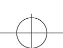
**ABSTRACT** Effect of heat treatment processes on the microstructure and mechanical properties of a medium carbon low alloy steel was studied by means of color metallography, XRD and mechanical tests. The adopted heat treatment processes included air quenching and then austempering in salt bath, water-cooling and then austempering in salt bath, as well as directly austempering in salt bath. The results show that after treatments according to the above three processes the steel may exhibited microstructure composed of different amount of bainite and martensite, and better mechanical properties in comparison with the cast ones, i.e. its impact toughness and hardness were increased by 92%-183% and 31%-55% respectively. For the case of air cooling and then austempering in salt bath, the amount of bainite decreased gradually with the increase of air cooling time while the amount of martensite progressively increased, correspondingly its hardness and impact toughness showed a tendency of increase and decrease respectively. The mechanical performance of the medium carbon low alloy steel is closely related to the ratio of bainite to martinsite in the microstructure. It is noted that the steel with a duplex microstructure of 50%-60% bainite and 30%-40% martensite exhibited an optimal comprehensive mechanical performance.

**KEY WORDS** metallic materials, bainite / martensite mixed microstructure, austempering, color metallography, ductile fracture

贝氏体/马氏体复相钢的硬度高、韧性好, 综合力学性能优良, 在矿山、建材等领域有极大的应用价值[1-3]。Tomita等[4]对中碳低合金钢的研究表明: 在马氏体基体上分布少量上贝氏体不影响钢的强韧性, 贝氏体/马氏体复相组织和无碳化物贝氏体/马氏体复相组织改善钢的强韧性, 含适量的下贝氏体或无碳化物贝氏体的贝氏体/马氏体复相组织既改善钢的韧性又提高强度。黄维刚等[5]和宋余九等[6]的研究表明, 在中低碳和中高碳低合金钢中, 与单一的马氏体组织相比, 含适量下贝氏体的贝氏体/马氏体复相组织钢的强度少许下降, 韧性明显改善。刘东雨等[7]研究表明: 贝氏体/马氏体复相钢在具有优良的

* 云南省科学技术厅项目619320130010。
2014年12月17日收到初稿; 2015年3月5日收到修改稿。
本文联系人: 李祖来, 教授





强韧性的同时, 又具有较高的疲劳极限和门槛应力值。蒋业华等[8]的研究表明: 中碳低合金贝氏体/马氏体复相钢的强韧性配合良好, 抗磨料磨损性能优异, 具有很好的综合力学性能。蔡明晖等[9]研究表明: 用适量贝氏体代替马氏体能使组织中硬相与软相之间的硬度比减少, 有助于改善硬相的韧性, 从而提高复相钢的综合性能。但是, 上述工作对贝氏体在组织中的占比及其与性能间的关联机制研究较少。本文对中碳低合金钢进行水淬+盐浴等温淬火、空冷+盐浴等温淬火等热处理, 用XRD测试、彩色金相分析[10]和定量金相分析等手段表征复相组织中贝氏体、马氏体及奥氏体的含量, 研究不同热处理工艺对中碳低合金钢组织与力学性能的影响, 探索材料性能与贝氏体、马氏体及奥氏体含量的关联。

## 1 实验方法

对实验用钢应用C的固溶强化、C与Mn稳定奥氏体、Mn的提高淬透性、Si的强烈抑制碳化物的析出以及Cr与B提高钢的强度的作用[11-13], 其化学成分列于表1。

采用砂型铸造试验用钢, 冶炼设备为50 kg中频感应炉, 钢液出炉温度为1520℃、浇铸温度1450℃, 浇铸成基尔试块。用线切割得到尺寸为10 mm×10 mm×55 mm的标准夏比V型冲击试样, 用于测试材料的冲击韧性。

对制备的多组冲击试样进行热处理, 热处理工艺分别为: (1) 900℃保温12 min+水冷2−4 s+300℃盐浴等温淬火40 min; (2) 900℃保温12 min+300℃盐浴等温淬火40 min; (3) 900℃保温12 min+空冷2−4 s+300℃盐浴等温淬火40 min; (4) 900℃保温12 min+空冷6−8 s+300℃盐浴等温淬火40 min; (5) 900℃保温12 min+空冷10−12 s+300℃盐浴等温淬火40 min。等温淬火在75%$KNO_3$+25%$NaNO_3$混合盐浴中进行, 每组热处理选3个试样, 与铸态试样作为对照。

用Rigaku MiniFlex 600 Co靶衍射仪衍射图谱分析物相, 残余奥氏体的含量为

$$W_a = \frac{I_a}{I_a + I_b/K_{b/a}} \tag{1}$$

式中 $W_a$为残余奥氏体相的质量分数, $I_a$为残余奥氏体衍射峰强度, $I_b$为基体衍射峰强度, $K_{b/a}$为残余奥氏体与基体的衍射最强峰的积分强度比[14]。通过彩色金相技术利用Image-Pro Plus计算贝氏体的含量, 根据贝氏体与残余奥氏体进行计算马氏体含量。用Lepera试剂[10]腐蚀制备彩色金相试样, 腐蚀液为10 g/L的偏重亚硫酸钠的水溶液与40 g/L的苦味酸的乙醇溶液按1∶1混合, 腐蚀时间为3 min。为了避免视场选取带来的实验误差, 试验中每个试样分别选取20个视场[15], 取各数据的平均值。

用JBN-300B冲击试验机测定铸态及热处理态试样的冲击韧性, 用150型洛氏硬度计测定试样的硬度, 用扫描电镜观察冲击断口的形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热处理工艺对中碳低合金钢组织的影响

图1给出了不同热处理工艺试样的X射线衍射曲线。分析可知, 经过本研究设计的不同热处理, 材料的物相均由奥氏体和$\alpha$铁素体构成。因奥氏体的(110)$\gamma$衍射峰和马氏体的(110)$\alpha$衍射峰重叠, 实验中选用奥氏体(220)$\gamma$的衍射峰和马氏体(110)$\alpha$衍射峰作比较, 计算残余奥氏体含量。计算结果表明, 水冷2~4 s+盐浴等温淬火、直接盐浴等温淬火、空冷2−4 s+盐浴等温淬火、空冷6−8 s+盐浴等温淬火、空冷10−12 s+盐浴等温淬火后, 残余奥氏体的含量分别为25%、14.1%、12.7%、8.1%、7.6%。

图2给出了4%硝酸酒精腐蚀不同状态的中碳低合金钢试样显微组织, 从图2可见, 铸态组织主要为典型的片状珠光体, 经水冷2−4 s+盐浴等温淬火热处理后的组织由残余奥氏体和针叶状组织构成,

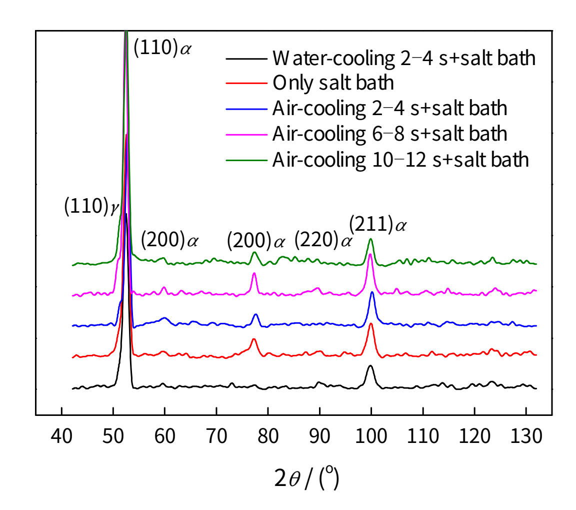



**图1** 不同热处理工艺试样的XRD图谱

**Fig.1** XRD patterns of samples of the different heat treatment process

**表1** 中碳钢低合金钢的化学成分

**Table 1** Chemical composition of low alloy medium carbon steel (%, mass fraction)

| Elements | C | Si | Mn | Cr | B |
|---|---|---|---|---|---|
| Content | 0.4-0.5 | 2.0-2.3 | 2.5-2.8 | 0.5-0.75 | 0.005-0.0075 |

针叶呈一定夹角相交, 分布散乱, 针叶粗细不相同。马氏体比下贝氏体难以腐蚀, 经4%硝酸酒精轻腐蚀后马氏体颜色较浅, 贝氏体颜色较深; 针叶状马氏体和针叶状下贝氏体都呈暗黑色, 各个针状物之间都有一定的夹角, 针状马氏体短而粗两针叶相交呈60°角, 下贝氏体针细而长分布较任意, 两针叶相交为55−65°[11]。因此, 图2b中的针叶状组织有可能是马氏体组织, 也可能是下贝氏体组织, 无法加以区分。

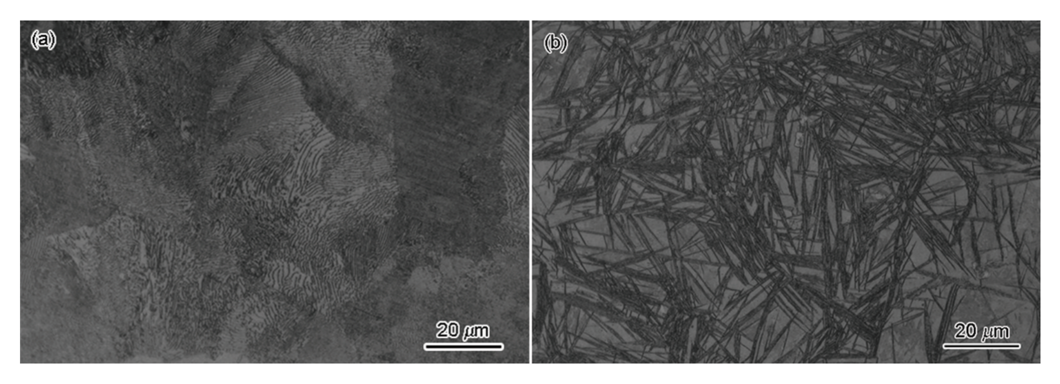



**图2** 用4%硝酸酒精腐蚀的不同状态中碳低合金钢试样的显微组织

**Fig.2** Microstructure of low alloy medium carbon steel at cast (a), water-cooling 2−4 s and austempering in austempering in salt bath, eroded by 4% nitric acid alcohol solution (b)

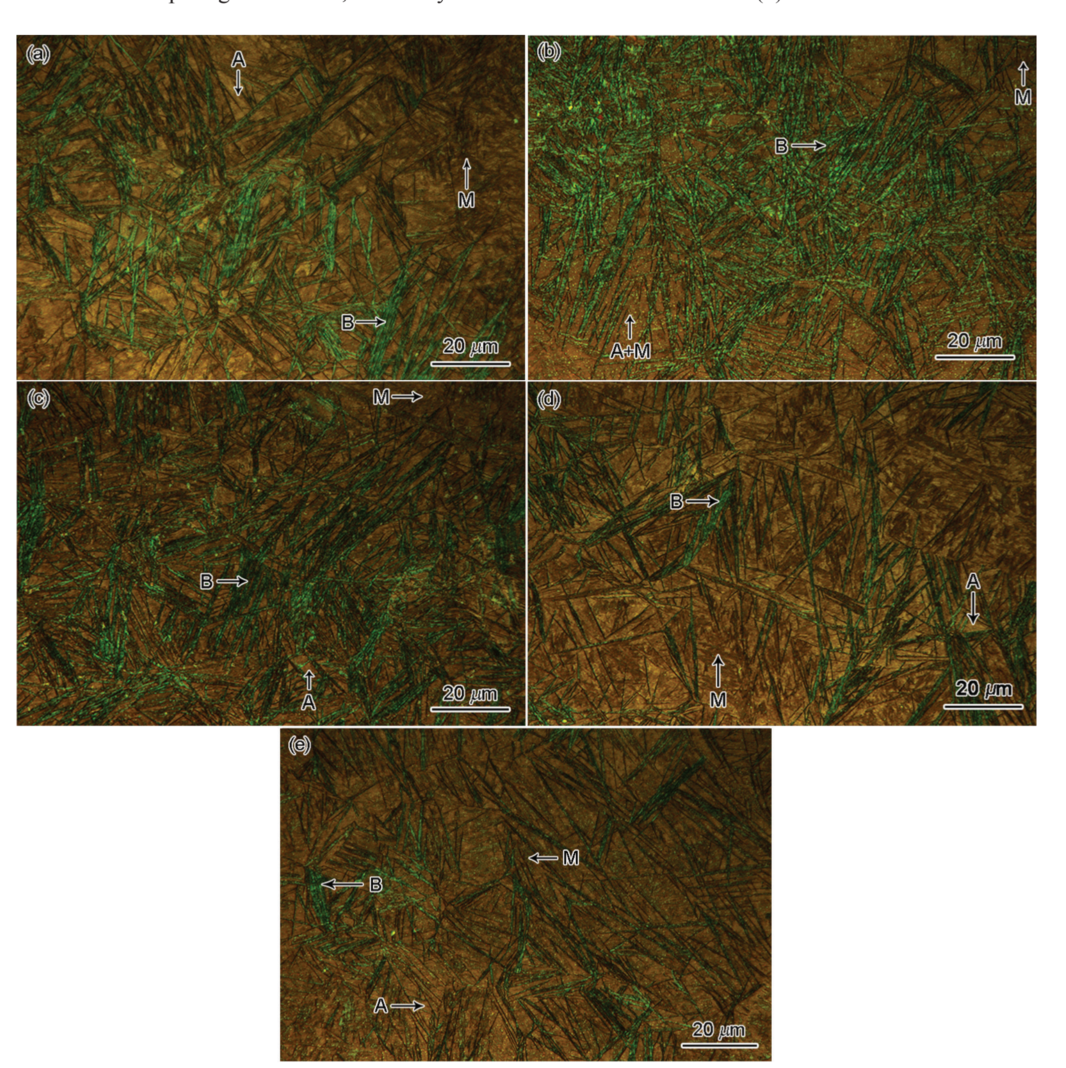



**图3** 经过不同热处理后试样的彩色金相组织

**Fig.3** Colored metallography of different heat treatment process (a) water-cooling 2−4 s and austempering in austempering in salt bath, (b) austempering in austempering in salt bath, (c) air-cooling 2−4 s and austempering in austempering in salt bath, (d) air-cooling 6−8 s and austempering in austempering in salt bath, (e) air-cooling 10−12 s and austempering in austempering in salt bath

图3给出了不同热处理工艺后试样的彩色金相组织。贝氏体较马氏体、残余奥氏体易于被腐蚀, 因此在腐蚀过程中贝氏体迅速被腐蚀, 马氏体和残余奥氏体腐蚀较慢。腐蚀3 min时Lepra试剂在腐蚀程度较大的贝氏体表面会形成一层硫化物或亚硝酸盐膜, 在反光显微镜下呈绿色; 马氏体腐蚀程度较浅, 难以附着硫化物或亚硝酸盐膜, 在反光显微镜下呈褐色或棕色; 残余奥氏体难以被腐蚀, 在反光显微镜下呈现浅褐色或亮白色[16]。观察结果表明, 腐蚀成绿色的下贝氏体与马氏体、残余奥氏体有很大的形态区别, 下贝氏体为细而长的针状结构, 马氏体为短而粗的板条状结构, 对图2b中难以区分的粗大针叶是多个贝氏体板条聚集重叠造成的, 因此用彩色金相技术很容易地区分贝氏体与马氏体。

由图3可知, 水冷2−4 s+盐浴等温淬火(图3a)和直接盐浴等温淬火淬火(图3b)得到的下贝氏体针叶尺寸小, 数量多, 针叶间距小; 不同程度的空冷+盐浴等温淬火热处理得到的下贝氏体针叶较大, 数量少, 针叶间距也较大(图3c、d和e)。其主要原因是, 空冷时温度降低较慢, 碳原子在温度较高时扩散能力强, 在贝氏体中铁素体形成的同时碳原子可由铁素体-奥氏体相界面向奥氏体充分扩散, 从而得到由条状铁素体组成的贝氏体。由于形成温度高, 过冷度小, 新相和母相自由能差小, 故铁素体条较宽, 数量少, 条间距较大。反之, 经水冷+盐浴等温淬火或直接盐浴等温淬火热处理时过冷度较大, 新相和母相自由能差大, 形成的铁素体条较窄, 数量多, 条间距也小[17]。

用XRD测试、彩色金相分析和定量金相分析技术对复相组织中贝氏体、马氏体及奥氏体的含量进行测量和计算, 金相组织中绿色针状组织为下贝氏体, 占整个视场的百分比, 即为贝氏体的相对含量。经测试, 不同热处理工艺的材料组织中的下贝氏体含量分别为: 29.28%、56.26%、35.6%、25.8%、14.9%, 马氏体的含量可根据贝氏体与残余奥氏体的含量计算得出, 不同热处理工艺组织中各物相的含量列于表2。

由表2可见: 下贝氏体的含量越高, 马氏体的含量越少, 残余奥氏体的含量也相对较少。由图3可见, 图3b中绿色针状下贝氏体含量高、褐色板条马氏体含量少, 图3e中绿色针状下贝氏数量少、褐色板条马氏体含量高。这与计算结果是一致的。

图4给出了空冷+盐浴等温淬火热处理工艺中不同空冷时间对贝氏体等组织含量的影响。可以看出, 各种组织含量的不同在于热处理过程中空冷时间的不同(直接盐浴等温淬火等温淬火, 视空冷时间为零), 结合表2中不同热处理工艺的组织含量可知: 在盐浴等温淬火处理之前进行空冷处理, 随着空冷时间的增加等温处理得到的贝氏体含量逐渐减少, 残余奥氏体含量呈增加趋势。直接盐浴等温淬火淬火, 过冷度较大, 新相与母相自由能差大, 形成的铁素体条多, 下贝氏体含量较高; 经空冷10−12 s再盐浴等温淬火热处理, 因过冷度很小下贝氏体的含量也较少。另一方面, 随着过冷度的减小过冷奥氏体相变驱动力变小, 相变速度减缓, 甚至相变较为

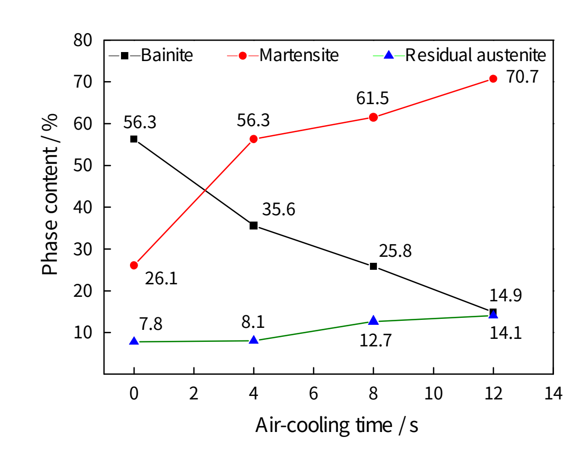



**图4** 空冷+盐浴等温淬火热处理的空冷时间对贝氏体等组织含量的影响曲线

**Fig.4** Effects curve of air-cooling time on the content of microstructure after air-cooling and austempering in salt bath heat treatment process

**表2** 不同热处理工艺后试样的各组织的含量

**Table 2** Content of microstructure after different heat treatment process

| Heat treatment process | Bainite/% | Martensite/% | Residual austenite/% |
|---|---|---|---|
| Water-cooling 2−4 s and austempering in salt bath | 29.28 | 45.72 | 25 |
| Austempering in salt bath | 56.26 | 26.14 | 7.6 |
| Air-cooling 2−4 s and austempering in salt bath | 35.6 | 56.3 | 8.1 |
| Air-cooling 6−8 s and austempering in salt bath | 25.8 | 61.5 | 12.7 |
| Air-cooling 10−12 s and austempering in salt bath | 14.9 | 70.7 | 14.1 |

困难, 因此残余奥氏体含量随过冷度的减小而增加。不同于直接盐浴等温淬火淬火, 水淬+盐浴等温淬火处理会迅速生成一定量的马氏体, 且马氏体板条较为粗大, 表面浮凸比较明显[11](图3a); 再进行等温转变时, 由于试样温度较低, 相变驱动力不足, 只有部分过冷奥氏体转变为贝氏体, 其余的以残余奥氏体的形式保留下来。因此, 水冷+盐浴等温淬火淬火组织马氏体与残余奥氏体含量相对较高。

**2.2 热处理工艺对中碳低合金钢性能的影响**

表3列出了热处理前后试样的硬度与冲击韧性。可以看出, 与铸态相比, 热处理后试样的硬度与冲击韧性均有大幅度地提高, 冲击韧性提幅约为92%−183%、硬度提幅约31%−55%。结合图2可知, 铸态时组织主要由片状珠光体构成, 热处理后组织转变为贝氏体/马氏体复相组织, 马氏体硬而脆, 下贝氏体韧性较好, 复相组织兼具马氏体的高硬度和贝氏体的强韧性, 因此综合力学性能得以大幅提升。对比发现, 直接盐浴等温淬火处理得到的组织冲击韧性最好, 但是硬度最低; 空冷10−12 s+盐浴等温淬火处理得到的组织冲击韧性最差, 硬度最高。结合表2不同热处理组织含量可见: 直接盐浴等温淬火处理得到的贝氏体含量最高、马氏体含量最低, 空冷10−12 s+盐浴等温淬火处理得到的贝氏体含量最少、马氏体含量最多。这表明, 力学性能与组织中各物相的含量密切相关。比较水冷2−4 s+盐浴等温淬火与空冷2−4 s+盐浴等温淬火: 水冷处理的组织贝氏体含量少于空冷组织贝氏体含量, 但是残余奥氏体含量远多于空冷组织, 其冲击韧性相当, 可见残余奥氏体对钢的冲击韧性有一定提高; 比较不同空冷时间的等温处理可见, 冲击韧性随着贝氏体含量的减少有降低的趋势, 硬度随着马氏体含量的增加有增大的趋势。

图5给出了空冷+盐浴等温淬火热处理工艺中空冷时间对力学性能的影响曲线。可以看出, 在空冷+盐浴等温淬火热处理工艺中, 随着空冷时间的增加硬度与冲击韧性分别呈升高和降低的趋势。结合图4空冷+盐浴等温淬火热处理工艺中空冷时间对组织的影响可知, 随着空冷时间的增加马氏体含量逐渐增加, 贝氏体含量逐渐降低。进一步说明, 合金钢的力学性能与组织密切相关。综上所述, 水冷2−4 s+盐浴等温淬火、空冷2−4 s+盐浴等温淬火、空冷6−8 s+盐浴等温淬火处理得到的组织硬度和冲击韧性均较好。研究表明: 含残余奥氏体含量高的多相组织钢具有更好的综合韧塑性能[18], 残余奥氏体含量过高降低材料的疲劳极限和门槛应力值, 降低材料耐磨寿命[19]。因此, 组织中残余奥氏体的含量不宜过高, 约5%−15%最佳。为了使中碳低合金钢具有良好的综合力学性能, 组织中贝氏体的含量应为30%−40%、马氏体的含量为50%−60%, 中碳钢的硬度与冲击韧性会匹配较好。

图6给出了铸态与空冷2−4 s+盐浴等温淬火热处理的试样断口形貌。可以看出, 铸态试样断面较为平滑、有明显的“河流花样”特征[20], 为解理断裂; 而对等温处理后的试样则观察到大量塑性变形的痕

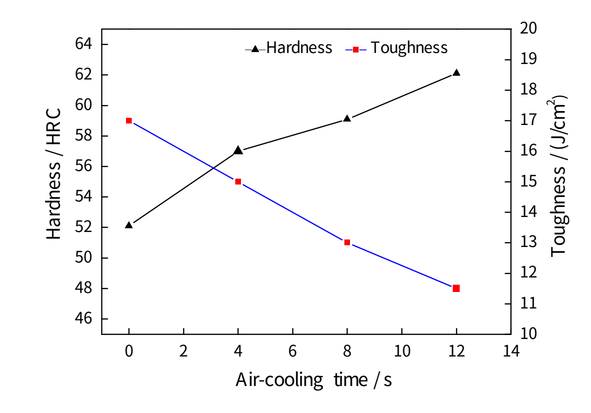



**图5** 空冷+盐浴等温淬火热处理的空冷时间对力学性能的影响

**Fig.5** Effects of air-cooling time on mechanical properties in air-cooling and austempering in salt bath heat treatment process

**表3** 热处理前后试样的硬度和冲击韧性

**Table 3** Comparing before and after heat treatment process of the sample hardness and impact toughness

| Heat treatment process | Toughness (J/cm$^2$) | Hardness (HRC) |
|---|---|---|
| Water-cooling 2−4 s and austempering in salt bath | 13.5 | 55.0 |
| Austempering in salt bath | 17.0 | 52.5 |
| Air-cooling 2−4 s and austempering in salt bath | 15.0 | 57.0 |
| Air-cooling 6−8 s and austempering in salt bath | 13.0 | 59.1 |
| Air-cooling 10−12 s and austempering in salt bath | 11.5 | 62.1 |
| Cast | 6.0 | 40.0 |

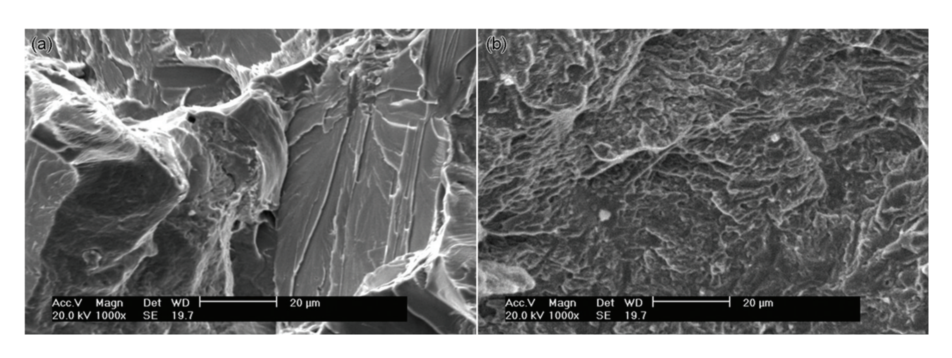



**图6** 不同状态下冲击试样的断口形貌

**Fig.6** Fracture morphology of impact samples at casting (a), air-cooling 2−4 s and austempering in salt bath (b)

迹形成剪切韧窝, 断面沿硬质相边缘断裂, 为塑性断裂。这些结果, 与铸态试样的冲击韧性较低、等温处理后冲击韧性较高是相符的。在试样断裂前, 当裂纹扩展时受到残余奥氏体的阻碍作用, 使大量冲击功被吸收, 转变为微观塑变。从图6b可以看出: 韧窝数量多、尺寸小、分布均匀, 在断口处有韧性撕裂棱, 与空冷2−4 s+盐浴等温淬火热处理所得到的高硬度、高韧性的数据是匹配的。这说明, 中碳低合金钢经过等温淬火后形成下贝氏体/马氏体复相组织, 不但有较高的韧性, 还有较好的塑性。

## 3 结 论

1. 对中碳低合金钢采用空冷+盐浴等温淬火和水冷+盐浴等温淬火热处理可得到不同下贝氏体含量的贝氏体/马氏体复相组织, 材料性能比铸态有大幅度提高, 冲击韧性提高92%−183%、硬度提高31%−55%。

2. 进行空冷+盐浴等温淬火热处理, 随着空冷时间的增加复相组织中下贝氏体含量逐渐降低、马氏体含量逐渐升高, 而材料的硬度和冲击韧性分别呈增加和降低趋势。

3. 中碳低合金钢的性能与各组织的含量密切相关, 随着复相组织中下贝氏体含量的增加(即马氏体含量的降低)材料的硬度和冲击韧性分别呈降低和增加趋势, 当下贝氏体含量为30%−40%、马氏体含量50%−60%时贝氏体/马氏体复相组织强韧性匹配较好。

## 参 考 文 献

1 R.C.D.Richardson, The Relationships between Wear Behavior and Basic Material Properties for Pearitic Steels, Wear of materials, **60**(1), 75(1980)

2 Ahmadabadi M N, Bainitic transformation in austempered ductile iron with reference to untransformed austenite volume phenomenon, Metallurgical and Materials Transactions A, **28**(10), 2159(1997)

3 FANG Hongsheng, LIU Dongyu, BAI Bingzhe, CHANG Kaidi, GU Jialin, YANG Zhigang, The latest advancement of carbide free bainite/martensite duplex phase steel, Heat Treatment of Metals, **26**(10), 4(2001)
(方鸿生, 刘东雨, 白秉哲, 常开地, 顾家琳, 杨志刚, 无碳化物贝氏体/马氏体复相钢的新进展, 金属热处理, **26**(10), 4(2001))

4 Tomita Y, Morioka K, Effect of microstructure on transformation-induced plasticity of silicon-containing low-alloy steel, Materials Characterization, **38**(4), 243(1997)

5 HUANG Weigang, XU Rong, FANG Hongsheng, ZHENG Yankang, Impact toughness of medium low carbon silicon modified bainitic steel, Journaol of Iron and Steel Research, **9**(2), 31(1997)
(黄维刚, 徐 蓉, 方鸿生, 郑燕康, 中低碳含硅空冷贝氏体钢的冲击韧性, 钢铁研究学报, **9**(2), 31(1997))

6 SONG Yujiu, LU Jintang, LIU Jinghua, SHEN Lian, RAO Qichang, ZHOU Huijiu, The strength and toughness of the martensite bainite mixed microstructure, Transactions of Materials and Heat Treatment, **3**(1), 11(1982)
(宋余九, 芦锦堂, 刘静华, 沈 莲, 绕启昌, 周慧久, 马氏体贝氏体复合组织的强度与韧性, 金属热处理学报, **3**(1), 11(1982))

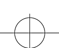
7 LIU Dongyu, XU Hong, YANG Kun, BAI Bingzhe, FANG Hongsheng, Effect of bainite/ martensite mixed microstructure on the strength and tough of low carbon alloy steel, Acta Metallurgica Sinica, **40**(8), 882(2004)
(刘东雨, 徐 鸿, 杨 昆, 白秉哲, 方鸿生, 贝氏体/马氏体复相组织对低碳合金钢强韧性的影响, 金属学报, **40**(8), 882(2004))

8 JIANG Yehua, Doctorate Dissertation, Controlled cooling bainite phase wear-resisting cast iron grinding balls and research of cast steel plate, Kunming University of Science and Technology, 2000
(蒋业华, 博士论文, 控制冷却贝氏体复相耐磨铸铁磨球和铸钢衬板的研究, 昆明理工大学, 2000)

9 CAI Minghui, DING Hua, ZHANG Sujian, LI Long, TANG Zhengyou, Deformation and fracture characteristics of ferrite/bainite dual-phase steels, Chinese Journal of Materials Research, **23**(1), 83(2009)
(蔡明晖, 丁 桦, 张苏建, 李 龙, 唐正友, 铁素体/贝氏体双相钢的变形和断裂特性, 材料研究学报, **23**(1), 83(2009))

10 Girault E, Jacques P, Harlet Ph, Mols K, Van Humbeeck J Aernoudt E, Delannay F, Metallographic methods for revealing the multiphase microstructure of TRIP-assisted steels, Materials Characterization, **40**(2), 111(1998)





11 CUI Zhongqi, TAN Yaochun, *Metallography and Heat Treatment*, 2nd Edition (Beijing, Mechanical Industry Press, 2007) p.308
(崔忠圻, 谭耀春, 金属学与热处理, 第2版 (北京, 机械工业出版社, 2007) p.253, p.260, p.308)

12 ZHAO Hui, SHI Jie, LI Nan, WANG Cunyu, HU Jin, HUI Weijun, CAO Wenquan, Effects of Si on the microstructure and mechanical property of medium Mn seel treated by quenching and partitioning process, Chinese Journal of Materials Research, **25**(1), 45(2011)
(赵 晖, 时 捷, 李 楠, 王存宇, 胡 劲, 惠卫军, 曹文全, Si对中锰钢淬火配分组织和性能的影响, 材料研究学报, **25**(1), 45 (2011))

13 CHEN Yantang, FANG Hongsheng, BAI Bingzhe, YANG Zhigang, LI Qi, HOU Chuanji, GAO Fan, Effect of silicon on impact wear behavior of high strength and high toughness bainitic steels, Heat Treatment of Metals, **26**(8), 5(2001)
(陈颜堂, 方鸿生, 白秉哲, 杨志刚, 李 琪, 侯传基, 高凡, Si对高强度高韧性贝氏体钢冲击磨损性能的影响, 金属热处理, **26**(8), 5 (2001))

14 LI Shutang, *Metal X- ray Diffraction and Electron Microscopic Analysis Technology* (Beijing, Metallurgical Industry Press, 1980) p.143
(李树棠, 金属X射线衍射与电子显微分析技术, (北京, 冶金工业出版社, 1980) p.143)

15 HAN Bo, ZHANG Fucheng, LV Bo, ZHENG Chunlei, E Lijun, ZHANG Peng, Colored metallography of bainite steel, Heat Treatment of Metals, **34**(10), 42(2009)
(韩 波, 张福成, 吕 博, 郑春雷, 鄂丽君, 张 朋, 贝氏体钢彩色金相的研究, 金属热处理, **34**(10), 42(2009))

16 ZHANG Xun, The application of colored metallographic in power system, Journal of Anhui Electric Power College for Staff, **7**(1), 96 (2002)
(张 珣, 彩色金相在电力系统的应用, 安徽电力职工大学学报, **7** (1), 96(2002))

17 XU Zuyao, LI Xuemin, The diffusion of carbon during the formation of low carbon martensite, Acta Metallergica Sinica, **19**(2), 83 (1983)
(徐祖耀, 李学敏, 低碳马氏体形成时碳的扩散, 金属学报, **19**(2), 83(1983))

18 REN Yongqiang, SHANG Chengjia, ZHANG Hongwei, YUAN Shengfu, CHEN Erhu, Effect of retained austenite on toughness and plasticity of 0.23C-1.9Mn-1.6Si steel, Chinese Journal of Materials Research, **28**(4), 274(2014)
(任勇强, 尚成嘉, 张宏伟, 袁胜福, 陈二虎, 0.23C-1.9Mn-1.6Si钢中的残余奥氏体对韧塑性的影响, 材料研究学报, **28**(4), 274 (2014))

19 YANG Fubao, BAI Bingzhe, LIU Dongyu, CHANG Kaidi, WEI Dongyuan, FANG Hongsheng, Microstructure and properties of a carbide-free bainite/martensite ultra-high strength steel, Acta Metallurgica Sinica, **40**(3), 296(2004)
(杨福宝, 白秉哲, 刘东雨, 常开地, 韦东远, 方鸿生, 无碳化物贝氏体/马氏体复相高强度钢的组织与性能, 金属学报, **40**(3), 296 (2004))

20 YAN Yunhui, MA Pengren, CAO Yuguang, ZHANG Jian, Recognition and classification of metal fracture surface images based on syntax pattern recognition, China Mechanical Engineering, **15**(3), 259(2004)
(颜云辉, 马朋仁, 曹宇光, 张坚, 金属断口图像句法模式识别与分类方法, 中国机械工程, **15**(3), 259(2004))



